

Навігація та геоінформаційні системи

УДК 355.588

doi: 10.26906/SUNZ.2025.2.5-12

І. Ю. Грідасов¹, Г. В. Худов¹, І. А. Хижняк¹, М. О. Яловега¹, В. В. Бурков²

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТУ РУХУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ЛІТАКОВОГО ТИПУ ПРИ ПОШУКУ ПОВІТРЯНОГО СУДНА, ЯКЕ ЗАЗНАЛО ЛИХА ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РІВНОМІРНО-ОПТИМАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ПОШУКУ

Анотація. Предметом вивчення в статті є маршрут руху безпілотної літальної апарату літакового типу при проведенні пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха. **Завдання:** У даній статті пропонується провести аналіз існуючих методів пошуку повітряного судна, оптимізацію маршруту руху для безпілотної літальної апарату літакового типу при пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха з використанням рівномірно-оптимальних стратегій пошуку. На першому етапі роботи представлено вирішення оптимізаційної задачі пошуку для рівномірно-оптимальної стратегії пошуку. На другому етапі роботи розроблена блок-схема алгоритму для пошуково-рятувальної операції із використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку. На третьому етапі проілюстровано результати застосування рівномірно-оптимальної стратегії пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха з використанням мови програмування Python. Розглянуті шляхи використання отриманих наукових результатів. Запропоновано можливі шляхи подальших наукових досліджень, які будуть ґрунтуватися на моделюванні авіаційних катастроф та розрахунку кількісних показників за результатами маршруту руху безпілотної літальної апарату літакового типу, із застосуванням для даної задачі тренажеру (симулятора), у якому безпілотної літальної апарату буде використовуватися, як засіб пошуку. Використовуваними методами є: теоретичні методи аналізу та синтезу, методи теорії імовірності, методи математичної статистики, методи комбінаторики, методи математичного моделювання, математичний апарат теорії матриць, методи диференційного числення, методи теорії оптимізації, методи математичної логіки, метаевристичні методи оптимізації, генетичні алгоритми, аналітичні та емпіричні методи порівняльного дослідження. **Висновки.** У роботі проведена оптимізація маршруту руху безпілотної літальної апарату літакового типу при пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха із використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку. Новими науковими результатами є: виконана задача оптимізації маршруту руху безпілотної літальної апарату літакового типу при пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха, розроблена блок-схема алгоритму реалізації методу пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха із використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку, отриманні результати застосування рівномірно-оптимальної стратегії пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха із використанням мови програмування Python, які в свою чергу підтверджують ефективність застосування удосконаленого методу пошуку. Сформульовані можливі напрями для подальших досліджень в контексті виявлення повітряних суден, які зазнали лиха. Дослідження були проведені за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу “Наука для зміцнення обороноздатності України”, назва проєкту “Інформаційна технологія автоматизованого сегментування зображень об’єктів в системах націлювання ударних FPV-дронів на основі алгоритмів ройового інтелекту”, реєстраційний номер 2023.04/0153.

Ключові слова: аварійна ситуація; безпілотної літальної апарату; маршрут руху; повітряне судно; пошук; оптимізація; пошуково-рятувальне забезпечення; пошуково-рятувальна операція; рівномірно-оптимальна стратегія.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Актуальність проведення наукових досліджень в області пошуково-рятувальних операцій екіпажів повітряних суден, які зазнали лиха, є особливо важливою задачею в сучасному світі з огляду на деякі ключові фактори.

По-перше, в сучасному світі відбулося суттєве зростання авіаційного трафіку, особливо в комерційному секторі, що в свою чергу збільшило ймовірність виникнення авіаційних подій [1]. Зазначене потребує проведення ефективних і швидких пошуково-рятувальних операцій. Незважаючи на відносно високий рівень безпеки сучасних авіаційних технологій, ризик авіаційних подій залишається актуальним через такі фактори, як несприятливі погодні

умови, технічні несправності повітряних суден, людський фактор тощо.

По-друге, збільшення виникнення авіаційних подій та втрати повітряних суден пов’язані із збільшенням інтенсивності сучасних збройних конфліктів (війн) у ХХІ (двадцять першому) столітті, зокрема російсько-українська війна, палістино-ізраїльська війна, війна в Сирії тощо. Інтенсивне застосування в сучасних війнах широкої номенклатури різних засобів протиповітряної оборони (ППО) робить бойові винишувачі та інші типи літаків доволі вразливою ціллю [2]. Зазначений фактор потребує проведення добре спланованих пошуково-рятувальних операцій, які обмежені за часом та мають свої особливості у зв’язку з великими ризиками для рятувальних підрозділів. Вони пов’язані із протидією противника, у разі якщо операції з пошуку та рятування відбуваються на

території, яка контролюється противником. Додатковими викликами можуть стати: застосування противником засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), засобів ППО, що в свою чергу значно ускладнює проведення пошуку та порятунку екіпажу, який зазнав лиха. Зазначені фактори призводять до необхідності удосконалення існуючих методів пошуку в умовах ведення бойових дій.

По-третє, сучасні виклики, пов'язані із змінами кліматичних умов, вимагають також удосконалення методів пошуку і рятування. Авіакатастрофи, пов'язані із екстремальними погодними явищами, такими як тайфуни, бурі та аномальні погодні умови, суттєво ускладнюють існуючі методи пошуку повітряних суден, які зазнали лиха. Прикладом таких пошукових операцій є авіатроща, яка відбулася 19 травня 2024 року, в якій загинув президент Ірану Раїсі та всі члени екіпажу, які перебували в гелікоптері. Масштабна пошуково-рятувальна операція, яка тривала майже добу, була ускладнена погодними умовами (густим туманом) [3].

Особливо важливим чинником, який надає можливості для удосконалення методів пошуку є технологічний прогрес у галузі безпілотних літальних апаратів (БпЛА), штучного інтелекту та супутникових систем зв'язку. Слід зазначити, що традиційні методи пошуку, які використовуються в міжнародній практиці не передбачають специфіку застосування БпЛА, супутників в операціях пошуку та рятування [4]. Наукові дослідження, спрямовані на інтеграцію цих технологій у світовій системі пошуку та рятування мають вагомий потенціал для підвищення ефективності операцій, що ймовірно у майбутньому може зменшити час реагування та збільшити шанси на виживання пасажирів та екіпажу повітряного судна, яке зазнало лиха.

Крім цього, глобалізація авіаційних перевезень означає, що авіакатастрофи можуть відбуватися у віддалених або важкодоступних регіонах світу, де існуючі методи пошуку можуть мати певні недоліки та бути менш ефективними. Це підкреслює необхідність у міжнародному співробітництві та стандартизації підходів до проведення пошуково-рятувальних операцій, що також потребує наукових досліджень.

У даній науковій роботі запропонована оптимізація маршруту руху БпЛА літакового типу при пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха з використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку. Використання БпЛА літакового типу в пошуково-рятувальних операціях перш за все пов'язане з їхніми унікальними тактико-технічними характеристиками, які дозволяють ефективно покривати великі площі в короткі проміжки часу. На відміну від вертольотів або літаків, БпЛА літакового типу здатні тривалий час перебувати в повітрі, здійснювати моніторинг з великої висоти та передавати зображення в реальному часі, що особливо важливо при обмеженій видимості або складних погодних умовах. Такий підхід дозволяє не лише мінімізувати витрати часу на обстеження ймовірних зон перебування повітряного судна, яке зазнало лиха, але й забезпечує раціональне використання наявних

ресурсів у рятувальних підрозділах. Врахування ймовірностей місцезнаходження об'єкта пошуку, швидкості та дальності польоту БпЛА, а також обмежень зон польоту дозволяє оптимізувати маршрут, який забезпечує максимальне покриття території з найвищим очікуваним результатом. Запропонований метод може бути реалізований у реальних умовах і доповнений інтеграцією із геоінформаційними системами, супутниковими даними та алгоритмами машинного навчання для більш точної оцінки ймовірності знаходження об'єкта пошуку.

Таким чином, проведення наукових досліджень в області пошуково-рятувального забезпечення, а саме застосування БпЛА літакового типу для пошуково-рятувальних операцій є актуальною задачею. Отримані результати наукових досліджень в майбутньому можуть бути використані в пошуково-рятувальних операціях, з урахуванням сучасних викликів та загроз, які виникають перед рятувальними підрозділами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз досліджень останніх років за напрямом проведення пошуково-рятувальних операцій, екіпажів повітряних суден, які зазнали лиха демонструють значний прогрес у застосуванні новітніх технологій, зокрема БпЛА, супутникових навігаційних систем, штучного інтелекту тощо [5]–[11]. У даних наукових роботах відображається тенденція до інтеграції цих технологій у загальну (міжнародну) систему рятувальних заходів, що дозволяє суттєво підвищити ефективність і точність виявлення повітряних суден, які зазнали лиха, особливо в складних умовах проведення пошуково-рятувальної операції. Одним із ключових аспектів останніх досліджень є акцент на розвиток автоматичного аналізу великих обсягів даних, які надходять із різних джерел (радіолокаційних станцій, супутників тощо), для швидкого визначення можливого місцезнаходження повітряного судна, яке зазнало лиха.

У роботі [5] розроблено обґрунтування можливостей нарощування спроможностей авіаційної компоненти оперативно-рятувальної служби Державної служби надзвичайних ситуацій України шляхом впровадження БпЛА для виконання завдань оперативного моніторингу природних екосистем і технологічних об'єктів з високим рівнем ризику виникнення надзвичайних ситуацій. Результатом роботи є наведена класифікація БпЛА, обґрунтування вимог до БпЛА в інтересах цивільного захисту та обґрунтування вимог до льотно-технічних характеристик БпЛА, які використовуються у пошуково-рятувальних операціях. У роботі проведені розрахунки величин радіусів розвороту, кутових швидкостей розвороту та можливих перевантажень БпЛА під час обстеження районів в який відбулася надзвичайна ситуація.

Суть [6] полягає в дослідженні архітектури, яка може бути застосована для керування кількома БпЛА, задіяними у пошуково-рятувальних операціях. У запропонованій системі один оператор здатний координувати дії набору роботів для отримання відповідної інформації про навколишнє середовище. Ця

робота виконана з метою розробки змішаної наземної та повітряної роботизованої платформи для підтримки пошуково-рятувальних операцій в умовах високогір'я. На відміну від типових налаштувань взаємодії людини та БпЛА, тут оператор не повністю управляє БпЛА, але бере участь у пошуково-рятувальних заходах, тому може давати роботам лише розрізнені та неповні інструкції. У даній роботі обговорюються домен, структура взаємодії та виконавча система для автономного виконання пошуково-рятувальних заходів. Зазначена система була апробована у реальній пошуковій операції із залученням двох БпЛА, оснащеними бортовими камерами.

Наукова робота [7] присвячена дослідженням, які спрямовані на порятунок заблукалих, хворих або поранених людей за допомогою автономних БпЛА. У статті розглянута проблема виявлення постраждалих людей в густо-лісистій місцевості, яка має певні складності, через оклюзію, запропоновані дієві механізми їх виявлення. Автори доказали, що автоматичне виявлення постраждалої людини в умовах оклюзії можна значно покращити шляхом поєднання багато перспективних зображень перед класифікацією. Для вирішення проблемного питання автори здійснили інтеграцію зображення за допомогою бортового оптичного секціонування (AOS) – методу створення зображень із синтетичною апертурою, який використовують безпілотні камери для захоплення неструктурованих теплових світлових полів, для того щоб досягти цього з точністю та запам'ятовуванням 96 % і 93 % відповідно.

Перевагою роботи [8] є запропонований алгоритм розподілу завдань для кількох роботизованих систем для різних рівнів БпЛА із використанням ринкового підходу для оптимізації ресурсів пошуково-рятувальної місії. Досліджений алгоритм перевіряє наявність транспортних засобів, характеристики кожного завдання та корисне навантаження, необхідні вхідні дані, а потім надає кожному транспортному засобу план завдань і команди для подальших дій. Запропонований алгоритм було перевірено шляхом виконання кількох пошуково-рятувальних операцій в моделюванні гірської місцевості з реальними розмірами, отримані результати показали надійність та ефективність запропонованої системи порятунку потерпілих осіб.

У науковій публікації [9] представлені результати початкової оцінки комп'ютеризованого методу інтерпретації, перевіреного в порівнянні з ручними методами під час імітації пошуково-рятувальних операцій типу Search and Rescue (SAR). Проведена оцінка зосереджена на використанні ресурсів, доступних для рятувальних підрозділів, які виконують операції типу SAR, зокрема: даних від свідків, програмних засобів тощо. Проте, результати цього випробування є неоднозначними, оскільки традиційна група виявила більше об'єктів, але вимагала більше часу, у людино-годинах, щоб виявити об'єкти. Автори зауважили про необхідність проведення подальших експериментів, які будуть засновані на можливостях рятувальних підрозділів, з метою визначення, наскільки комп'ютерні методи пошуку ефек-

тивні в операціях типу SAR. Також заслуговує на увагу зростаюча роль у стандартизації підходів до рятувальних операцій. У роботі [10] автори наголошують на важливості розробки єдиних протоколів зв'язку та використання спільних платформ для обміну інформацією між країнами, що значно покращує координацію і ефективність міжнародних пошуково-рятувальних операцій.

Аналіз наукової публікації [11], яка розглядає перші випадки застосування БпЛА у пошуково-рятувальних операціях, має важливе значення для розуміння перспектив використання цих технологій у надзвичайних ситуаціях. У роботі детально описано два випадки застосування БпЛА під час рятувальних операцій, що дозволяє провести порівняльний аналіз переваг та недоліків цих технологій. Аналіз наукової публікації дозволяє зробити висновок, що БпЛА мають значний потенціал для пошуково-рятувальних операцій, однак їх ефективність значною мірою залежить від специфіки операції, технічних характеристик та умов експлуатації.

Таким чином, проведений аналіз сучасних наукових публікацій за тематикою проведення наукових досліджень, демонструє значний прогрес у впровадженні новітніх технологій, зокрема БпЛА, супутникових систем, штучного інтелекту, роботизованих платформ тощо у процесі проведення пошуково-рятувальних операцій. Перевагою існуючих наукових публікацій є те, що дослідження застосування БпЛА в пошуково-рятувальних операціях показали свою ефективність, як у міських умовах, так і в важкодоступних природних зонах. Вони дозволяють швидко і безпечно проводити огляд великих територій, мінімізуючи ризики для рятувальних підрозділів. Також, сучасні дослідження вказують на значний потенціал автоматизації та роботизації пошуково-рятувальних операцій, що забезпечує покращену координацію дій і можливість більш точного та швидкого реагування на надзвичайні ситуації.

На теперішній час, значна увага приділяється інтеграції великих обсягів даних з різних джерел, таких як, радіолокаційні системи та супутникові зображення, що дозволяє суттєво підвищити точність визначення місцезнаходження повітряного судна, яке зазнало лиха.

Проте, слід констатувати, що технології, які залучаються до пошуково-рятувальних операцій, досі стикаються з певними обмеженнями, такими як залежність від погодних умов, тривалість польоту БпЛА, а також необхідності удосконалення маршруту руху БпЛА в районі пошуку. Також слід зауважити, що досліджень в області пошуку повітряних суден, які зазнали лиха із застосуванням сучасних засобів пошуку обмежена кількість. Таким чином, напрям наукових досліджень даної наукової публікації, а саме в контексті пошуково-рятувальних операцій при пошуку повітряних суден, які зазнали лиха є актуальним, враховуючи сучасні виклики та загрози.

Мета статті – оптимізація маршруту руху БпЛА літакового типу при пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха із використанням рівномірно-оптимальних стратегій пошуку.

Основна частина

Задача пошуку та виявлення об'єктів в повітрі та на воді відіграє вирішальну роль у забезпеченні успішного проведення авіаційних і морських пошуково-рятувальних операцій. Важливість цього аспекту стала особливо очевидною під час пошукових заходів, спрямованих на виявлення рейсу Malaysia Airlines MH370. Незважаючи на масштабні зусилля, що включали близько 40 суден та авіаційних засобів, якими було обстежено понад 4.6 мільйона квадратних кілометрів акваторії Індійського океану, пошукова операція завершилася без отримання підтверджених результатів щодо виявлення уламків літака або пасажирів [12].

Проектування пошукових операцій на земній поверхні (океану) стикається з двома основними труднощами. Перша пов'язана з високим рівнем невизначеності при визначенні району пошуку. Для прикладу, у випадку рейсу MH370 цільові області постійно переглядалися через постійний потік нової інформації, включаючи супутникові дані, випадкові спостереження, сміття та сигнали, які могли походити від аварійного радіомаяка [12]. Дана невизначеність може ускладнюватися динамічними процесами дрейфу на поверхні океану. Океанічні течії нестабільні та можуть спричиняти помилки в оцінці ймовірного місця падіння об'єкта, особливо в ті дні, що проходять між самим інцидентом та початком пошуково-рятувальної операції. Окрім цього, через неточність моделей дрейфу остаточні оцінки цільових зон пошуку, як правило, залишаються з великою часткою невизначеності.

Другим джерелом труднощів є те, що навіть коли район пошуку відомий і невизначеність щодо його меж добре описана, наприклад, через розподіл ймовірностей, проблема проектування оптимальних маршрутів для рятувальних підрозділів залишається нерозв'язаною [13]. На практиці, для вирішення цього питання район пошуку розподіляють на кілька підрайонів, кожний з яких призначається певному рятувальному підрозділу. Таким чином, рятувальні підрозділи обстежують підрайони організованими маршрутами, зазвичай, виконуючи пошук паралельними галсами (рис. 1) або вздовж лінії шляху (рис. 2) повітряного судна, яке зазнало лиха [4], [13–16].

Метод пошуку з паралельними галсами є простим у плануванні та реалізації для районів з нескладною геометрією, однак він не може бути ефективно застосований до складних районів пошуку, які виникають через дрейфи на поверхні океану або нерівномірний розподіл ймовірності знаходження цілей. Цей метод також не є достатньо гнучким для реальних операцій, наприклад, у разі, якщо один з рятувальників збивається з маршруту, необхідно буде назначати нові пошукові області та рятувальні підрозділи, що ускладнює проведення пошуково-рятувальних операцій.

Метод пошуку вздовж лінії шляху передбачає проведення пошукових заходів уздовж передбачуваного маршруту об'єкта, який зазнав лиха. Даний метод ґрунтується на ідеї, що літак, який зазнав лиха, ймовірно знаходиться поблизу свого останнього відомого місцезнаходження або вздовж запланованого курсу.

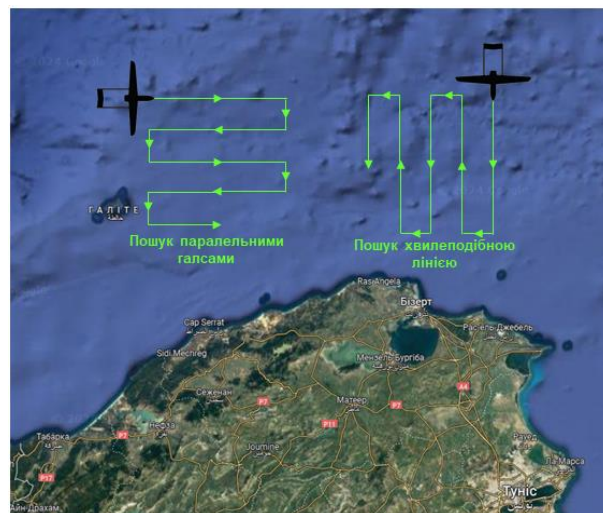


Рис. 1. Метод пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха паралельними галсами



Рис. 2. Метод пошуку вздовж лінії шляху

Рятувальні підрозділи організовують пошук, слідуючи вздовж цієї лінії, що дозволяє ефективно охопити територію ймовірного місця інциденту. Метод часто використовується на початкових етапах пошуково-рятувальних операцій для швидкого визначення потенційного місця лиха.

Проектування траєкторії руху засобів пошуку являє собою багатокomпонентне завдання, що пов'язане з управлінням кількома рятувальними засобами, де цільова функція включає аналіз змінних у часі розподілів ймовірностей. Важливим елементом успішних пошуково-рятувальних операцій є врахування зміни динаміки навколишнього середовища. Водночас, у наукових роботах [17]–[18], присвячених як статичним, так і динамічним підходам до задач пошуку, надається багато корисних і значущих деталей, що розширюють можливості пошукових методик в умовах постійно змінюваного середовища, в якому здійснюється пошук.

Розглянувши існуючі методи пошуку, які використовуються на практиці, далі пропонується оптимізувати маршрут руху БПЛА літакового типу, при пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха із використанням рівномірно-оптимальних стратегій пошуку. Засобами пошуку на практиці можуть бути літаки, кораблі, БПЛА тощо. У контексті даної роботи, будемо вважати, що засобом пошуку є БПЛА літакового типу, який здійснює послідовний, закономірний пошук. Основною задачею удосконалення маршруту руху БПЛА із використанням рівномірно-

оптимальних стратегій пошуку є зменшення витраченого часу в пошуково-рятувальній операції від моменту початку пошуку до виявлення повітряного судна, яке зазнало лиха.

По-перше, в рамках вирішення поставленої наукової задачі постає необхідність вирішення оптимізаційної задачі пошуку для рівномірно-оптимальної стратегії пошуку. Оптимізаційна задача необхідна для прийняття найкращого рішення в умовах обмежених ресурсів та змінних умов. У контексті пошуково-рятувальних операцій, зокрема пошуку повітряних суден, які зазнали лиха, оптимізаційна задача спрямована на мінімізацію часу і ресурсів, необхідних для виявлення об'єкту пошуку.

Оптимізація пошуку базується на мінімізації ймовірності не виявлення об'єкту пошуку за час відведений на пошук, із врахуванням ймовірних моделей пошуку. Функція ймовірності того, що об'єкт пошуку буде виявлений до моменту часу t розраховується за формулою (1):

$$K(t) = 1 - \int_0^t \int_{\Omega} \lambda(x, t) y(x, t) dt dx, \quad (1)$$

де $\lambda(x, t)$ – щільність ймовірності виявлення об'єкту пошуку в точці x в момент часу t ; $y(x, t)$ – функція інтенсивності пошуку.

Функція ймовірності визначається через інтеграл за площею району пошуку Ω , із врахуванням ймовірності виявлення об'єкту пошуку в залежності від часу та місцезнаходження. Оптимізаційна задача полягає у мінімізації функції ймовірності, математично вона буде мати вигляд:

$$\int_{\Omega} y(x, t) dx \rightarrow \min. \quad (2)$$

Наведений вираз означає, що пошуково-рятувальні підрозділи повинні підібрати таку стратегію пошуку, при якій час до моменту виявлення об'єкту пошуку буде мінімальним. При цьому функції $\lambda(x, t)$ та $y(x, t)$ повинні задовольняти наступним умовам:

Функція інтенсивності пошуку $y(x, t)$ пов'язана з функцією щільності ймовірності виявлення $\lambda(x, t)$ за допомогою виразу (3):

$$y_t(x, t) = -\lambda(x, t) y(x, t), \quad x \in \Omega, t > 0, \quad (3)$$

де x – координата в області пошуку; Ω – область пошуку.

Функція щільності ймовірності виявлення об'єкту пошуку $\lambda(x, t)$ має бути невід'ємною вираз (4):

$$\lambda(x, t) \geq 0, \quad x \in \Omega, t > 0. \quad (4)$$

Інтенсивність пошуку в області Ω задана функцією $L(t)$ вираз (5):

$$\int_{\Omega} \lambda(x, t) dx = L(t), \quad t > 0, \quad (5)$$

де $L(t)$ – інтенсивність пошуку в момент часу t (пошукові зусилля);

Початкова умова для інтенсивності пошуку $y(x, 0)$ задається функцією $u(x)$ вираз (6):

$$y(x, 0) = u(x), \quad (6)$$

Рівномірно-оптимальна стратегія пошуку має наступну властивість: існує область пошуку $\Omega_+(t) \subset \Omega$, яка постійно розширюється за часом, таким чином, що стратегія пошуку позитивна в межах області $\Omega_+(t)$ та негативна в $\Omega \setminus \Omega_+(t)$. Крім цього, стратегія пошуку є часовою функцією. З самого початку є за необхідним вважати, $\lambda(x, t)$ задовольняє наступним вимогам (вираз (7)):

$$\begin{aligned} \lambda(x, t) &> \text{for } x \in \Omega_+(t), \\ \lambda(x, t) &= 0 \text{ for } x \in \Omega \setminus \Omega_+(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Вираз (8) демонструє, що на кожному $x \in \Omega$ існує певний момент часу $t(x)$, такий що $\lambda(x, t)$ позитивна для $t \in [t(x), T]$ і негативна для $t \in [0, t(x)]$:

$$\begin{aligned} \lambda(x, t) &> 0 \text{ for } t \in [t(x), T]; \\ \lambda(x, t) &= 0 \text{ for } t \in [0, t(x)]. \end{aligned} \quad (8)$$

На основі виразів (7) та (8) можливо зробити висновки, що стратегія пошуку є поступово зростаючою функцією, яка поступово охоплює всю область Ω у часі t , тобто $t(x)$ збільшується разом з x .

Властивості виразу (8) можливо отримати в результаті вирішення задачі оптимізації (вирази (2)–(6)). Далі в результаті вирішення задачі оптимізації, функція $\lambda(x, t)$ на практиці буде відповідати цим властивостям. Отже, для побудови такої стратегії пошуку, яка є рівномірно-оптимальною, тобто охоплює всю задану область пошуку рівномірно за часом, виведемо формулу (9):

$$\lambda(x, t) = \lambda_0(x) \exp \left(- \int_{t(x)}^t L(t) dt \right), \quad (9)$$

де $\lambda_0(x)$ – початкова функція пошуку в точці x .

Даний вираз дозволяє мінімізувати час пошуку всередині області покриваючи якомога більшу площу Ω_t в найкоротший час. Для практичної реалізації, рівномірно-оптимальної стратегії пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха, авторами розроблена блок-схема, яка відображає ключові етапи запропонованого алгоритму (рис. 3).

Блок-схема алгоритму включає основні етапи процесу пошуку. Процес пошуку розпочинається після отримання оповіщення про авіаційну подію. На етапі введення вихідних даних в програмні засоби заноситься апріорна інформація про подію, межі району пошуку, кількість засобів пошуку, час відведений на пошук тощо.

Наступним кроком є розподіл засобів пошуку, на якому визначений район пошуку поділяється на підрайони та проводиться рівномірне розподілення засобів пошуку в них.

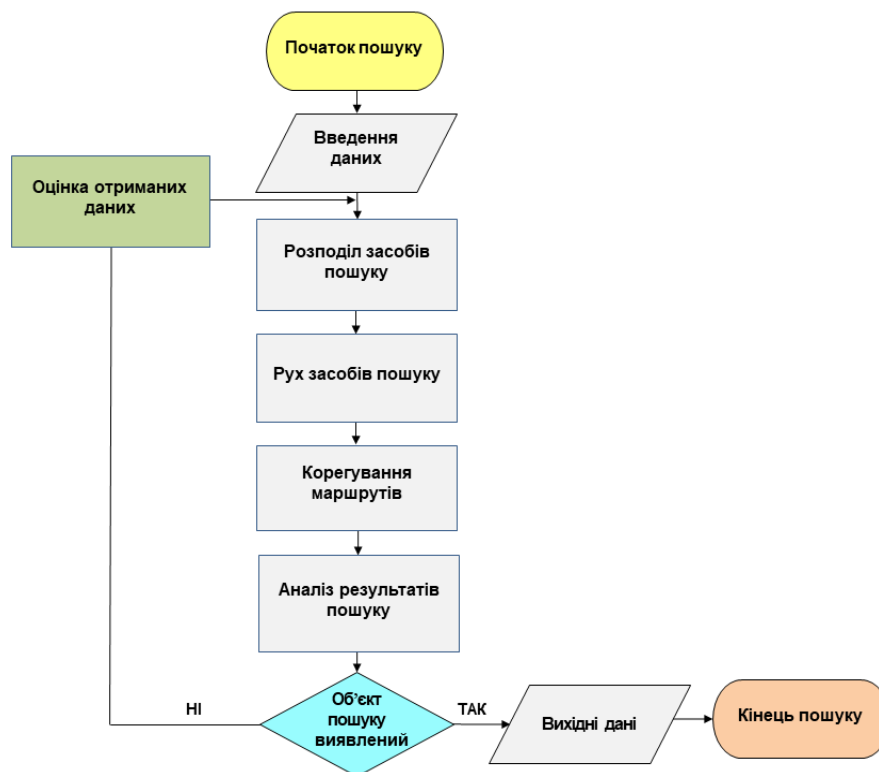


Рис. 3. Блок-схема алгоритму для практичної реалізації рівномірно-оптимальної стратегії пошуку

Далі організовується рух засобів пошуку (закономірний пошук) галсами, який здійснюється рівномірно у всьому районі пошуку.

Наступним етапом є корегування маршрутів засобів пошуку, який проводиться шляхом перерозподілу районів пошуку із врахуванням отриманої нової інформації про подію. Після обстеження підрайонів пошуку проводиться аналіз отриманих результатів. У разі, якщо об'єкт пошуку був виявлений – пошук завершується. У протилежному випадку, пошук повторюється в інших підрайонах із врахуванням оцінки отриманих нових даних.

Наведений алгоритм допомагає ефективно організувати пошук за допомогою декількох засобів пошуку, таких як, БпЛА літакового типу, які сліду-

ють за визначеними маршрутами з можливістю адаптації у процесі пошуково-рятувальної операції.

Рис. 4 ілюструє результати застосування рівномірно-оптимальної стратегії пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха, реалізованої з використанням мови програмування Python. Три авіаційних засоби пошуку (БпЛА літакового типу), починають пошук із різних точок і рухаються до ймовірної точки місцезнаходження об'єкту пошуку (позначено червоним), використовуючи паралельні траєкторії або так звані галси. Дані галси пошуку (рис. 1) є стандартною частиною стратегії для забезпечення рівномірного покриття досліджуваної області. Ключова ідея алгоритму полягає у мінімізації часу пошуку при максимальному покритті території.

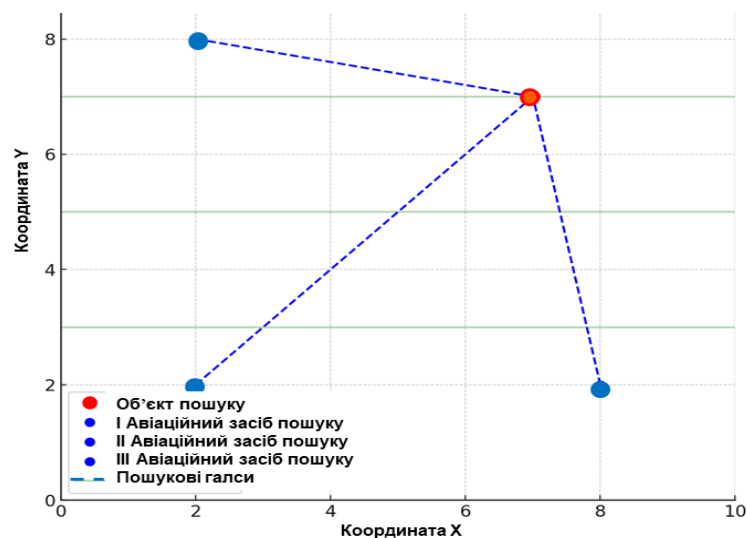


Рис. 4. Результат застосування рівномірно-оптимальної стратегії пошуку

Авіаційні засоби пошуку рухаються узгодженими траєкторіями руху, які адаптуються відповідно до динамічних змін або додаткової інформації, отриманої в процесі пошуку. Зображена схема демонструє важливість організації галсів для пошукових операцій і наочність рівномірно-оптимальної стратегії пошуку.

Таким чином, практична реалізація методу визначення маршруту руху для БпЛА літакового типу при пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха із використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку, може бути широко застосована в різних типах пошуково-рятувальних операцій. Основною перевагою даного маршруту руху БпЛА є необхідність відносно невеликого часу на виявлення об'єкту пошуку, перекриття усього району пошуку та простота реалізації.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на практичне моделювання різних авіаційних катастроф та розрахунків ймовірностей виявлення, часу необхідного для пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха, використовуючи рівномірно-оптимальну стратегію пошуку із застосуванням для даної задачі тренажеру (симулятора) БпЛА літакового типу, в якості засобу пошуку.

Висновки

У роботі проведена оптимізація маршруту руху БпЛА літакового типу при пошуку повітряного суд-

на, яке зазнало лиха із використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку.

Новими науковими результатами є:

– виконана задача оптимізації маршруту руху БпЛА літакового типу при пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха;

– розроблена блок-схема алгоритму реалізації методу пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха із використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку;

– отриманні результати застосування рівномірно-оптимальної стратегії пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха із використанням мови програмування Python, які в свою чергу підтверджують ефективність застосування удосконаленого методу пошуку.

Сформульовані можливі напрями для подальших досліджень в контексті виявлення повітряних суден, які зазнали лиха.

Подяка

Дослідження були проведені за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу “Наука для зміцнення обороноздатності України”, назва проєкту “Інформаційна технологія автоматизованого сегментування зображень об'єктів в системах націлювання ударних FPV-дронів на основі алгоритмів ройового інтелекту”, реєстраційний номер 2023.04/0153.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ACI World Airport Traffic Forecasts 2023–2052. *ACI World*. URL: <https://store.aci.aero/product/aci-world-airport-traffic-forecasts-2023-2052>
2. The combat statistics for all the aircraft currently in use. *MiGFlug*. URL: <https://migflug.com/jetflights/the-combat-statistics-for-all-the-aircraft-currently-in-use>
3. Helicopter carrying Iranian President Raisi crashes, prompting massive search operation. *CNN World*. URL: <https://edition.cnn.com/2024/05/19/middleeast/iranian-president-raisi-helicopter-intl/index.html>
4. International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual, vol. III. Mobile Facilities (Doc. 9731) 12 th Ed. 2022. 288 p.
5. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту: монографія / Д.В. Бондар, А.В. Гурник, А.О. Литовченко, В.В. Хижняк, В.Л. Шевченко, Д.М. Ядченко. Київ. 2022. 312 с.
6. J. Cacace, A. Finzi, V. Lippiello, M. Furci, N. Mimmo, L. Marconi. A control architecture for multiple drones operated via multimodal interaction in search & rescue mission. *International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. Lausanne, Switzerland: IEEE; 2016*. p. 233–239. DOI: 10.1109/SSRR.2016.7784304.
7. DC. Schedl, I. Kurmi, O. Bimber. Search and rescue with airborne optical sectioning. *Nature Machine Intelligence*. vol. 2(12). 2020. p. 783–790.
8. M. Rodriguez, A. Al-Kaff, A. Madridano, D. Martin, A. De La Escalera. Wilderness search and rescue with heterogeneous multi-robot systems. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Athens, Greece: Divani Caravel Hotel, 2020. p.110–116.
9. WT. Weldon, J. Hupy. Investigating methods for integrating unmanned aerial systems in search and rescue operations. *Drones*. 2020. vol. 4(3). p. 1–16. DOI: 10.3390/drones4030038.
10. JN. McRae, BM. Nielsen, CJ. Gay, AP. Hunt, AD Nigh. Utilizing drones to restore and maintain radio communication during search and rescue operations. *Wilderness Environ Medicine*. 2021. vol. 32, issue 1. p. 41–46. DOI: 10.1016/j.wem.2020.11.002.
11. C. Van Tilburg. First report of using portable unmanned aircraft systems (drones) for search and rescue. *Wilderness Environ Medicine*. 2017. vol. 28, issue 2. p. 116–118. DOI: 10.1016/j.wem.2016.12.010.
12. Stefan Ivić, Bojan Crnković, Hassan Arbabi, Sophie Loire, Patrick Clary and Igor Mezić. Search strategy in a complex and dynamic environment: the MH370 case. *Scientific reports*. 2020. vol. 10, issue 1. p. 1-15. DOI: 10.1038/s41598-020-76274-0.
13. Худов Г.В., Грідасов І.Ю., Жилін Є.І. Математична формалізація завдання пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха, авіаційними засобами. *Системи озброєння і військова техніка*. 2024. №1 (77). С. 117-123. DOI: 10.30748/soivt.2024.77.17.
14. Грідасов І.Ю., Худов Г.В. Аналіз методів пошуку повітряного судна, яке зазнало лиха, авіаційними засобами. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*. 2024. №2(80). С. 54-62. <https://doi.org/10.30748/zhups.2024.80.07>.
15. Грідасов І.Ю., Худов Г.В., Хижняк І.А. Визначення маршруту руху підрозділів, які задіяні до порятунку екіпажу повітряного судна, яке зазнало лиха. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: зб. тез доп. міжн. наук.-техніч. конф.*, м. Львів, 15-16 травня 2024 р. Львів, 2024. С.257.

16. Грідасов І. Ю., Худов Г.В., Хижняк І. А. Обстеження району пошуку повітряного судна ,яке зазнало лиха підрозділом спеціального призначення Національної гвардії України з використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку. *Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України (до 10-ї річниці створення Національної гвардії України)* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. (Харків, 24 жовт. 2024 р.). Харків, 2024. С. 296–298.
17. D. Stone. Theory of Optimal Search. New York, USA: *Mathematics in science and engineering*. 1975. p.288.
18. B. O. Koopman. Search and Screening. Operations evaluation group office of the chief of naval operations navy department, Washington. 1946. p. 179.

Received (Надійшла) 25.02.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.05.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

- Грідасов Ілля Юрійович** – провідний науковий співробітник НМВ забезпечення якості освітньої діяльності та вищої освіти, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Illia Hridasov – Leading Researcher of Scientific and Methodological Department for Quality Assurance of Educational Process and Higher Education, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: gridasovillya91@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-5689-0311>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58623833600>.
- Худов Геннадій Володимирович** – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри тактики радіотехнічних військ, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Hennadii Khudov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Radar Troops Tactic, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: 2345kh_hg@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196079841>.
- Хижняк Ірина Анатоліївна** – кандидат технічних наук, начальник НМВ забезпечення якості освітньої діяльності та вищої освіти, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Irina Khizhnyak – Candidate of Technical Sciences, Head of Scientific and Methodological Department for Quality Assurance of Educational Process and Higher Education, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Ukraine;
 e-mail: khizh_ia@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3431-7631>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196075236>.
- Яловега Микола Олексійович** – завідувач навчального кабінету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна
Mykola Yalovega – Head of the Training Office of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: yalovegamykola@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0000-7720-3111>.
- Бурков Віталій Валерійович** – старший викладач кафедри логістики підрозділів Національної академії Національної гвардії України, Харків, Україна
Vitalii Burkov – Senior Lecturer Department of Logistics Units of the National Academy National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
 e-mail: burkovvitalii@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0000-6300-7830>.

Optimization the route of an unmanned aerial vehicle during the search for an aircraft that has crashed using an uniformly optimal search strategy

Illia Hridasov, Hennadii Khudov, Irina Khizhnyak, Mykola Yalovega, Vitalii Burkov

Abstract. Unmanned aerial vehicles (UAV) have been a significant advancement in SAR operations, ushering in an era of increased technological efficiency. The seamless integration of UAV into various tasks of the aviation search and rescue process highlights their high ability to perform tasks that were once burdensome or even impossible for traditional aircraft search methods, which human factors can negatively impact them. The primary objective of SAR operations remains the rapid and accurate location of a crashed aircraft. This is followed by such important actions as handover, information exchange, and timely delivery of various supplies to victims. All this is done within time constraints. The inclusion of UAV in SAR operations offers numerous notable advantages, including ease of deployment, cost-effective maintenance, exceptional mobility, and the ability to hover in areas where human intervention may be dangerous, limited, or require rapid decision making. Also, many UAV tasks can be performed automatically, such as image segmentation, which can help -locate victims in the surveyed area. The methodology for using UAV systems in SAR type search and rescue operations covers several key components, such as operation management, risk assessment, sensor technology, and UAV route selection. This article proposes a study to substantiate an optimization the route of a fixed-wing UAV during the search for an aircraft that has crashed, using uniformly optimal search strategies. The article analyzes existing search methods, highlighting their advantages and disadvantages. In the first stage of the study, the solution to the optimization problem for a uniformly optimal search strategy is presented. At the second stage, the authors developed a flowchart for a search and rescue operation algorithm utilizing the uniformly optimal search strategy. In the third stage, the results of applying the uniformly optimal search strategy to locate an aircraft in distress are illustrated, with implementation demonstrated using the Python programming language. The study discusses the potential application of the scientific findings. Additionally, possible directions for further research are suggested, focusing on modeling aviation accidents and calculating quantitative indicators for the search method examined in the scientific publication. These directions include employing fixed-wing UAV simulator as a search tool for the given task.

Keywords: aircraft; emergency situation; search and rescue operation; search; optimization; personnel recovery; route planning; uniformly optimal strategy; unmanned aerial vehicles.